



Выявление неисправностей в группах мобильных роботов с использованием скользящих наблюдателей

¹ О.Ю. Сергиенко, ORCID: 0000-0003-4270-6872 <srgnk@uabc.edu.mx>

² А.Н. Жирабок, ORCID: 0000-0001-5927-7117 <zhirabok@mail.ru>

¹ Автономный университет Нижней Калифорнии (UABC),
Мексика, 21100, Нижняя Калифорния, Энсенада

² Дальневосточный федеральный университет,
Россия, 690090, Владивосток, ул. Суханова, 8

Аннотация. Работа посвящена изучению главных направлений в усовершенствованных вычислительных и информационных технологиях для эффективного решения задачи идентификации дефектов в группе мобильных роботов в присутствии возмущений. Для решения этой задачи привлекаются скользящие наблюдатели. Это облегчает реализацию концепции «умных» элементов в рассматриваемой группе роботов в процессе обобщенного управления ими: «умных» датчиков окружающей среды, связь, обработку информации и хранение данных сканирования. Предложенный новый подход к построению скользящих наблюдателей базируется на построении модели пониженного порядка исходной системы. Это позволяет уменьшить сложность реализации скользящих наблюдателей и ослабить ограничения, накладываемые на систему.

Ключевые слова: группа мобильных роботов; диагностирование; идентификация дефектов; скользящие наблюдатели.

Для цитирования: Сергиенко О.Ю., Жирабок А.Н. Выявление неисправностей в группах мобильных роботов с использованием скользящих наблюдателей. Труды ИСП РАН, том 33, вып. 1, 2021 г., стр. 137-150. DOI: 10.15514/ISPRAS-2021-33(1)-10

Благодарности. Работа частично поддержана Российским научным фондом 16-19-00046-Р и Автономным университетом Нижней Калифорнии, Мексика (проект № 111/2071, 2018-2020).

Fault Identification in Mobile Robot groups using Sliding Mode Observers

¹ O. Sergiyenko, ORCID: 0000-0003-4270-6872 <srgnk@uabc.edu.mx>

² A. Zhirabok, ORCID: 0000-0001-5927-7117 <zhirabok@mail.ru>

¹ Autonomous University of Baja California (UABC),
Ensenada, Mexico, 21100

² Far Eastern Federal University,
8, Sukhanova, Vladivostok, 690091 Russia

Abstract. The paper studies the emerging trends in advanced computing and information technology for efficient solutions of fault identification problem for mobile robot groups under the unmatched disturbances. The sliding mode observers are considered for mentioned problem solution. It facilitates the concept of Smart everything inside the considered robotic group during its generalized control: smart surrounding sensing, communication, processing, and scanned data storing. The suggested novel approach to sliding mode observer

design is based on obtaining the reduced order model of the initial system. This allows reduce the complexity of sliding mode observer and relax restrictions imposed on the initial system.

Keywords: group of mobile robots; diagnosis; identification of faults; sliding mode observers

For citation: Sergiyenko O., Zhirabok A. Fault Identification in Mobile Robot groups using Sliding Mode Observers. Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS, vol. 33, issue 1, 2021, pp. 137-150 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2021-33(1)-10.

Acknowledgments. The work is partially supported by Russian Scientific Foundation 16-19-00046-P and by the Autonomous University of Baja California, Mexico (project No. 111/2071, in 2018-2020).

1. Введение

В настоящее время мобильные роботы (МР) являются одной из притягательных сфер применения современной теории управления [1-3]. Важнейший вызов в этой области – зависимость управляемого объекта (как отдельного робота, так и их групп) от надежности их компонент. Очевидно, что при функционировании отдельных МР и их групп актуальными становятся эффективные методы обнаружения и идентификации дефектов. Важность этой задачи подтверждается многочисленными статьями [4-8], опубликованными в этой области последние годы, где рассматриваются различные подходы для достижения этой цели.

Очень показательный пример такой группы роботов – несколько автоматических устройств, объединенных в группировку для решения глобальной задачи автоматизации сельскохозяйственных процессов. Такая группировка состоит из подгруппы летающих роботов [9] и подгруппы колесных наземных мобильных роботов [10], а также подсистем для информационного обмена [11] и подсистемы исполнительных приводов для процесса управления. Такая комплексная система представляет классический объект для многоцелевой оптимизации в нестационарной окружающей обстановке.

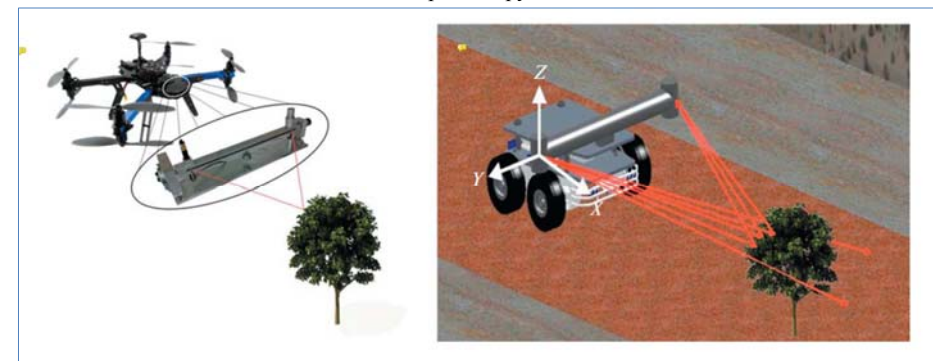


Рис.1. Использование лазерной сканирующей системы для измерения жизнеспособности насаждений: слева летающий мобильный робот; справа колесный мобильный робот

Fig. 1. Use of laser scanning TVS to measure the vegetation vitality by normalized differenced vegetation index: using flying mobile robot (left); b) using wheeled mobile robot (right)

Такая сложная группа состоит из летающих роботов (дронов) [9] и группы колесных МР [10, 11]. Подробности независимого использования летающих и наземных роботов приведены в наших предыдущих публикациях. Оба случая представлены на рис. 1, каждый из них имеет определенные преимущества и недостатки в смысле эффективности получения информации, ее обработки и хранения.

Работа [9] рассматривает использование дронов с лазерным сканером [10] для пролета над посадками, например, оливковыми садами, виноградниками (или другими видами зеленых насаждений). В экспериментах мы установили, что форма сигналов, полученных от сканера,

сильно зависит от интенсивности зеленого цвета (см. рис. 2). То есть имеется возможность оценить степень влажности почвы и использовать это для управления ирригацией.

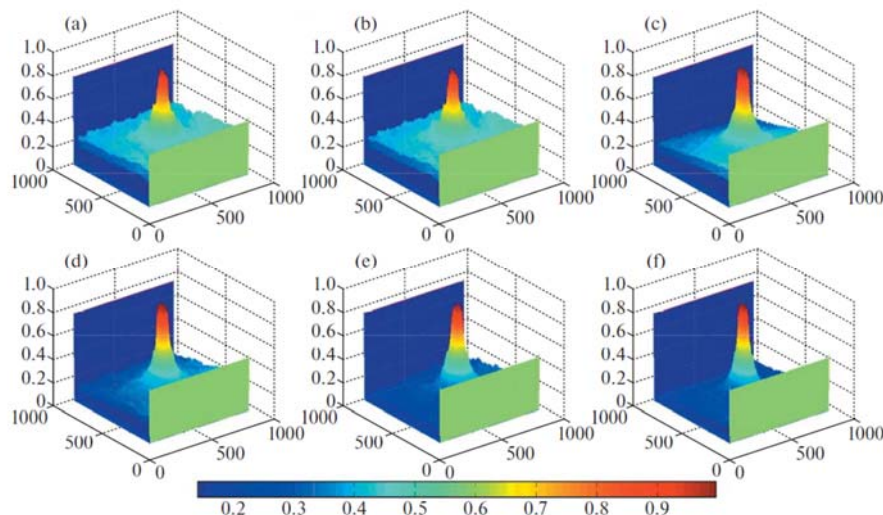


Fig. 2. Относительная шкала интенсивности лазерного отражения от подсвеченной поверхности с различными уровнями растительной жизнеспособности (зелёная пигментация листа)
Fig. 2. Relative scale of Reflectance of laser intensity on highlighted surface with different vegetation vitality (leaf green pigmentation)

Однако существенная нестабильность расположения летающих роботов делает затруднительным направление лазерного луча на каждый отдельный листок. Существенно проще собрать эти данные от наземных и медленно перемещающихся МР (рис. 1b). Такие данные будут более точными и лучше защищены от искажений. Очевидно, однако, что наземным роботам потребуется больше времени на выполнение задания, и в некоторых случаях они не смогут выйти за определенные границы. Следовательно, логично дополнить их летающей группой, которая может обозреть большое пространство за то же самое время, и теоретически не будет иметь препятствий для получения необходимой информации.

Проблемы ирригации будут решены лучше, если во внимание принимаются объединенные данные, полученные от обеих групп. Ясно, что в этом случае очень желательно иметь инструмент, выявляющий, какая часть полученной информации имеет меньше ошибок. Также важно отметить, что значительные ошибки в расположении дрона из-за больших вибраций и ветровых нагрузок будут на несколько порядков больше, чем шумы наземной части группы.

В упомянутых выше МР с системой технического зрения на основе лазерного сканирования интересным объектом для обнаружения и коррекции ошибок является электрическая система, предназначенная для коррекции пространственного положения лазерного луча. Ключевой проблемой в этой задаче [12, 13] является надлежащая компенсация эффектов нелинейного трения на конечной стадии остановки луча в желаемой точке, когда модель сухого трения не может учесть квантовый скачок между динамическим и статическим трением, и, следовательно, система управления не может компенсировать этот физический эффект для верного позиционирования сканирующего инструмента.

В [12, 13] приведен подход к компенсации этих эффектов, проверенный статистически. Очевидно, однако, что подходы к управлению, использующие очень примитивные модели

трения [14], никогда не обеспечат эффективную компенсацию трения, применимую к широкому классу приборов без использования очень строгих ограничений на условия среды вокруг трибологического узла. Конечно, такие модели будут перспективными при использовании более адекватного подхода к составляющим силы трения [15]. Однако улучшение таких моделей вызовет нежелательное увеличение числа датчиков и сложности системы, что приведет к понижению надежности и росту обрабатываемого объема данных.

Таким образом, в этом случае более продуктивным решением проблемы видится проектирование устройств, способных обнаруживать дефекты во всех элементах, входящих в систему, и затем искусственно уменьшать объем получаемой информации путем преднамеренного исключения данных, полученных от отказавших элементов. Разумеется, в этом случае исходное число данных должно быть избыточным относительно экспериментально (или модельно) установленного процента отказов.

Работа посвящена проблеме диагностирования дефектов в МР системах. Процесс диагностирования включает в себя генерацию невязки как результата рассогласования между поведением системы и ее эталонной модели, сопровождаемую принятием решения за счет анализа невязки. Проблема диагностирования интенсивно исследуется последние 30 лет, см., например, [16-18]. Было предложено несколько методов диагностирования: диагностические наблюдатели, соотношения паритета, идентификация. Существует много методов идентификации, один из них базируется на так называемых скользящих наблюдателях и использует особенности скользящего режима [19].

2. Методы идентификации дефектов

Скользящие наблюдатели используются для идентификации дефектов в линейных [20-24], нелинейных [25-27] и сингулярных системах [28], для обеспечения отказоустойчивого управления [29-31], в ряде практических приложений [32-34].

Для обеспечения отказоустойчивого управления работа [35] использует стратегию управления на основе скользящих наблюдателей, которые обеспечивают идентификацию дефектных элементов. Как только эти элементы идентифицированы, закон управления изменяется определенным образом, и система остается работоспособной. Подход, предложенный в [31, 36], предполагает каскадную схему реконфигурации и технику распределения управлений, что позволяет избежать перестройки контроллера.

Отметим, что скользящие наблюдатели в [37] и аналогичных работах строятся на основе исходной системы. Как результат, скользящие наблюдатели имеют полный порядок, в [26] строятся два скользящих наблюдателя. Кроме того, при построении таких наблюдателей на исходную систему накладывается ряд ограничений, в частности, в [37] и аналогичных работах требуется, чтобы система была минимально фазовой.

Новизна настоящей работы состоит в том, что скользящий наблюдатель строится не по исходной системе, а по ее редуцированной модели. В результате размерность наблюдателя получается меньшей, чем у исходной системы. Отметим, что редуцированная модель может не иметь некоторых особенностей исходной системы, которые препятствуют построению скользящего наблюдателя. Таким образом, ограничения, накладываемые на исходную систему, могут быть ослаблены. Это позволяет расширить класс систем, для которых скользящие наблюдатели могут быть построены.

В настоящей работе метод на основе скользящих наблюдателей используется для решения проблемы идентификации дефектов в МР при наличии возмущений. Для построения скользящего наблюдателя мы используем редуцированную модель исходной системы, не чувствительную к возмущениям. Это позволяет уменьшить сложность скользящего наблюдателя по сравнению с работами [21, 37, 26], где строятся наблюдатели полного порядка. Кроме того, ослабляются ограничения, накладываемые в [21, 37, 26] на исходную систему.

3. Формулирование проблемы

Рассмотрим МР, описываемый нелинейной моделью (детализированная версия системы (2.6) работы [1], р. 42):

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Fx(t) + Gu(t) + Dd(t) + L\rho(t) + C\Psi(x(t), u(t)), \\ y(t) &= Hx(T),\end{aligned}\quad (1)$$

где $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$, $y(t) \in R^l$ – векторы состояния, управления и выхода; F, G, H, C, D и L – известные постоянные матрицы, $d(t) \in R$ – функция, описывающая дефекты: при их отсутствии $d(t) = 0$ при появлении дефекта $d(t)$ становится неизвестной функцией времени, $\rho(t) \in R^p$ – неизвестная функция времени, описывающая действующие на систему возмущения; $\Psi(x, u)$ – нелинейная составляющая:

$$\Psi(x, u) = \begin{pmatrix} \varphi_1(A_1x, u) \\ \dots \\ \varphi_s(A_sx, u) \end{pmatrix},$$

$A_1, \dots, A_s$ – постоянные матрицы, $\varphi_1, \dots, \varphi_s$ – нелинейные функции. Предполагается, что функция $\Psi(x, u)$ удовлетворяет условию Липшица по аргументу x :

$$\|C\Psi(x, u) - C\Psi(x', u)\| \leq N\|x - x'\|,$$

где $N \geq 0$ – некоторая константа.

Для ряда практических значимых функций это условие не выполняется, однако выполняется обобщенное условие Липшица:

$$\|C\Psi(x, u) - C\Psi(x', u)\| \leq N\|x - x'\| + M, \quad (2)$$

$N, M \geq 0$ – некоторые константы.

Напомним, что в [27] предполагается, что система (1) удовлетворяет следующим условиям:

- 1) $rank(H[LD]) = rank([LD])$,
- 2) все инвариантные нули тройки $(F, [LD], H)$ лежат в левой полуплоскости.

Известно, что при этих предположениях система (1) может быть преобразована в композицию двух подсистем, имеющих следующие особенности: функции $d(t)$ и $\rho(t)$ входят только в первую подсистему, вектор выхода $y(t)$ зависит только от вектора состояния этой подсистемы и вторая подсистема устойчива. В настоящей работе задача идентификации решается без этих условий.

4. Построение редуцированной модели

Решение проблемы базируется на редуцированной модели системы (1), в общем случае описываемой следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}\dot{x}_*(t) &= F_*x_*(t) + G_*u(t) + J_*y(t) + D_*d(t) + L_*\rho(t) + C_*\Psi(x_*(t), y(t), u(t)), \\ y_*(t) &= H_*x_*(T),\end{aligned}\quad (3)$$

где $x_* \in R^k$ – вектор состояния, F_*, G_*, J_*, D_*, L_* и H_* – постоянные матрицы,

$$C_*\Psi(x_*, y, u) = \begin{pmatrix} \varphi_{i_1}(A_{*1i_1}x_* + A_{*2i_1}y, u) \\ \dots \\ \varphi_{i_k}(A_{*1i_k}x_* + A_{*2i_k}y, u) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$A_{*1i_1}, A_{*2i_1}, \dots, A_{*1i_k}, A_{*2i_k}$ – матрицы, подлежащие определению.

Предполагается, что $x_*(t) = \Phi x(t)$ и $y_*(t) = R_*y(t)$ для некоторых матриц Φ и R_* при $d(t) = 0$ и $\rho(t) = 0$. Из [38, 39] известно, что эти матрицы удовлетворяют условиям

$$\begin{aligned}\Phi F &= F_*\Phi + J_*H, \quad R_*H_* = H\Phi, \quad G_* = \Phi G, \quad D_* = \Phi D, \quad L_* = \Phi L, \\ C_* &= \Phi C, \\ A_{*i} &= (A_{*1i} \ A_{*2i}) \begin{pmatrix} \Phi \\ H \end{pmatrix}, \quad i = i_1, \dots, i_k.\end{aligned}\quad (5)$$

Рассмотрим метод построения системы (3), не чувствительной к возмущениям, которая будет использоваться при построении скользящего наблюдателя. Матрицы F_* и H_* ищутся в канонической форме следующего вида:

$$\begin{aligned}F_* &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_1 & 1 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & & 0 \\ & \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \alpha_{k-1} & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix}, \\ H_* &= (1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0),\end{aligned}\quad (6)$$

где $\alpha_1, \dots, \alpha_{k-1}$ – коэффициенты обратной связи, обеспечивающие устойчивость части модели, описываемой вектором $x_{**} = (x_{*2}, \dots, x_{*k})^T$.

Отметим, что устойчивость этой подсистемы гарантируется в [27] для произвольного k требованием “все инвариантные нули тройки $(F, [LD], H)$ лежат в левой полуплоскости”. Наша цель – ослабить это ограничение для практически важного случая $k \leq 3$.

Используя F_* и H_* в (6), получим из (5) уравнения для строк матрицы Φ и J_* :

$$\begin{aligned}\Phi_1 &= R_*H, \quad \Phi_1F = \Phi_2 + J_{*1}H, \\ \Phi_iF &= \Phi_{i-1} + \alpha_{i-1}\Phi_2 + J_{*i}H, \quad i = 2, \dots, k-1, \\ \Phi_kF &= \alpha_{k-1}\Phi_2 + J_{*k}H,\end{aligned}\quad (7)$$

где Φ_i и J_{*i} – i -е строки матриц Φ и J_* , $i = 1, \dots, k$, k – размерность модели (3).

Рассмотрим случай $k = 3$. Уравнения (7) можно привести к единственному уравнению путем ряда преобразований:

$$\begin{aligned}R_*HF &= \Phi_2 + J_{*1}H, \\ R_*HF^2 &= \Phi_2F + J_{*1}HF = J_{*1}HF + J_{*2}H + \alpha_1(R_*HF + J_{*1}H) = \\ &= J_{*1}HF + J_{*2}H + \alpha_1\Phi_2 = (J_{*1} + \alpha_1R_*)HF + (J_{*2} - \alpha_1J_{*1})H.\end{aligned}$$

Продолжая по аналогии, получим

$$\begin{aligned}R_*HF^3 &= (J_{*1} + \alpha_1R_*)HF^2 + (J_{*2} - \alpha_1J_{*1} + \alpha_2R_*)HF + (J_{*3} + \alpha_2J_{*1})H = \\ &= J'_{*1}HF^2 + J'_{*2}HF + J'_{*3}H,\end{aligned}\quad (8)$$

где

$$\begin{aligned}J'_{*1} &= J_{*1} + \alpha_1R_*, \\ J'_{*2} &= J_{*2} - \alpha_1J_{*1} + \alpha_2R_*, \\ J'_{*3} &= J_{*3} - \alpha_2J_{*1}.\end{aligned}\quad (9)$$

Известно [38, 39], что условие нечувствительности модели (3) к возмущениям имеет вид $\Phi L = 0$. Можно показать, что

$$\begin{aligned}\Phi_1 &= R_*H, \quad \Phi_2 = \Phi_1F - J_{*1}H = R_*HF - J_{*1}H, \\ \Phi_3 &= \Phi_2F - J_{*2}H - \alpha_1\Phi_2 = R_*HF^2 - J_{*1}HF - \alpha_1\Phi_2.\end{aligned}$$

Отсюда получаем, что условие $\Phi L = 0$ может быть записано в виде [39, 39]

$$(R_* - J_{*1} - J_{*2} - J_{*3})L^{(3)} = 0, \quad (10)$$

где

$$L^{(3)} = \begin{pmatrix} HL & HFL & HF^2L \\ 0 & HL & HFL \\ 0 & 0 & HL \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Как и в [27], функция $d(t)$ должна содержаться в первой компоненте вектора x_* . Это эквивалентно условию $\Phi_iD = 0, i = 2, 3$, которое можно представить в виде [39, 39]

$$(R_* - J_{*1} - J_{*2} - J_{*3})D^{(3)} = 0, \quad (11)$$

где

$$D^{(3)} = \begin{pmatrix} 0 & HFD & HF^2D \\ 0 & HD & HFD \\ 0 & 0 & HD \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Как правило, на практике $k \leq 3$. Отметим, что при $k > 3$ матрицы $L^{(k)}$ и $D^{(k)}$ становятся более сложными, в частности

$$L^{(4)} = \begin{pmatrix} HL & HFL & HF^2L & HF^3L \\ 0 & HL & HFL & HF^2L \\ 0 & 0 & HL & HFL + \alpha_1 HL \\ 0 & 0 & 0 & HL \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ и } D^{(4)} = \begin{pmatrix} 0 & HFD & HF^2D & HF^3D \\ 0 & HD & HFD & HF^2D \\ 0 & 0 & HD & HFD + \alpha_1 HD \\ 0 & 0 & 0 & HD \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Из (10) и (11) следует

$$(R_* - J_{*1} - \dots - J_{*k})(L^{(k)} - B^{(k)}) = 0, \quad (12)$$

$k = 1, 2, 3$. Для построения модели (3) минимальной размерности необходимо найти минимальное k , для которого (12) имеет решение; для конкретности, рассмотрим $k = 3$. Затем находится решение уравнения (12) в виде $(R_* - J_{*1} - J_{*2} - J_{*3})$ и решение уравнения (8) в виде $(J'_{*1} J'_{*2} J'_{*3})$ для матрицы R_* , найденной из (12). Для выяснения совместимости этих решений необходимо проверить разрешимость уравнения (9) для некоторых α_1 и α_2 . Если (9) разрешимо для α_1 и α_2 , удовлетворяющих условию устойчивости, то линейная часть модели построена. Отметим, что если $k = 1$, то $J'_{*1} = J_{*1}$ и решения совместимы.

Для построения нелинейной части найдем из (7) строки матрицы Φ , примем $C_* = \Phi C$ и проверим условие

$$\text{rank} \begin{pmatrix} \Phi \\ H \end{pmatrix} = \text{rank} \begin{pmatrix} \Phi \\ H \\ A_i \end{pmatrix}, i = i_1, \dots, i_k. \quad (13)$$

Если оно выполняется, принять $G_* = \Phi G$ и $D_* = \Phi D$; матрицы A_{*1i_1} и A_{*2i_1} , $i = i_1, \dots, i_k$ из нелинейной функции (4) определяются из (5). Если (13) не выполняется или условия (9) не разрешимы, находится другое решения уравнения (12) с прежней или большей величиной k . Как итог, модель (3) принимает вид

$$\begin{aligned} \dot{x}_{*1}(t) &= x_{*2}(t) + G_{*1}u(t) + J_{*1}y(t) + C_{*1}\Psi(x_*(t), y(t), u(t)) + ad(t), \\ \dot{x}_{**}(t) &= F_{**}x_{**}(t) + G_{**}u(t) + J_{**}y(t) + C_{**}\Psi(x_*(t), y(t), u(t)), \\ y_*(t) &= x_{*1}(t), \end{aligned} \quad (14)$$

где $a = \Phi_1 D \neq 0$, $x_{**} = (x_{*2}, \dots, x_{*k})^T$, F_{**} , G_{**} , J_{**} и C_{**} обозначают подматрицы матриц F_* , G_* , J_* и C_* , соответствующих вектору x_{**} , матрица F_{**} устойчива.

5. Построение скользящего наблюдателя

Скользящий наблюдатель ищется в виде

$$\begin{aligned} \hat{x}_{*1}(t) &= \hat{x}_{*2}(t) + G_{*1}u(t) + J_{*1}y(t) + C_{*1}\Psi(\hat{x}_*(t), y(t), u(t)) - be_y(t) + v(t), \\ \hat{x}_{**}(t) &= F_{**}\hat{x}_{**}(t) + G_{**}u(t) + J_{**}y(t) + C_{**}\Psi(\hat{x}_*(t), y(t), u(t)), \\ \hat{y}_*(t) &= \hat{x}_{*1}(t), \end{aligned} \quad (15)$$

где $b > 0$,

$$v(t) = \begin{cases} -g|a| \frac{e_y(t)}{\|e_y\|}, & \text{если } e_y(t) \neq 0, \\ 0 & \text{в противном случае,} \end{cases} \quad (16)$$

$$e_y(t) = \hat{y}_*(t) - y_*(t) = \hat{y}_*(t) - R_* y(t).$$

Используя (14) и (15), запишем уравнения для ошибок $e_1(t)$ и $e_2(t) = \hat{x}_{**}(t) - x_{**}(t)$:

$$\begin{aligned} \dot{e}_1(t) &= -be_1 + Qe_2(t) - ad(t) + v(t) + \Delta \Psi_1(t), \\ \dot{e}_2(t) &= F_{**}e_2(t) + \Delta \Psi_2(t), \end{aligned} \quad (17)$$

где $Q = (1 \ 0 \ \dots \ 0)$,

$$\Delta \Psi_1(t) = C_{*1}(\Psi(\hat{x}_*(t), y(t), u(t)) - \Psi(x_*(t), y(t), u(t))),$$

$$\Delta \Psi_2(t) = C_{**}(\Psi(\hat{x}_*(t), y(t), u(t)) - \Psi(x_*(t), y(t), u(t))).$$

Поскольку функции $C_{*1}\Psi(x_*, y, u)$ и $C_{**}\Psi(x_*, y, u)$ удовлетворяют условию Липшица (2) относительно x , то функции $C_{*1}\Psi(\hat{x}_*, y, u)$ и $C_{**}\Psi(\hat{x}_*, y, u)$ удовлетворяют этому условию относительно $\hat{x}_*$ также, и

$$\begin{aligned} \|\Delta \Psi_1(t)\| &\leq N_{*1}\|e(t)\| + M_{*1} \leq N_{*1}\|e_1(t)\| + N_{*1}\|e_2(t)\| + M_{*1}, \\ \|\Delta \Psi_2(t)\| &\leq N_{**}\|e_1(t)\| + N_{**}\|e_2(t)\| \end{aligned} \quad (18)$$

для некоторых чисел N_{*1} , M_{*1} и N_{**} . Отметим, что ненулевая величина M_{*1} используется для обеспечения существования скользящего режима в наблюдателе (15) (смотрите условие (19)). С другой стороны, известно [37], что скользящее движение обеспечивает равенство $e(t) = 0$, т.е. $\hat{x}_*(t) = x_*(t)$, и здесь можно принять $M_{*1} = 0$.

Поскольку матрица F_{**} устойчива, то для произвольной симметрической положительно определенной матрицы W существует симметрическая положительно определенная матрица P_2 , такая, что

$$F_{**}^T P_2 + P_2 F_{**} = -W.$$

Теорема. Если скаляр g удовлетворяет условию

$$g > \|d(t)\| + \frac{M_{*1}}{|a|}, \quad (19)$$

то существует скаляр b , такой, что скользящее движение системы (17) асимптотически устойчиво.

Доказательство теоремы основано на анализе функции Ляпунова

$$V(t) = e_1^T(t)e_1(t) + e_2^T(t)Pe_2(t)$$

и доказательстве того, что ее производная $\dot{V}(t) < 0$. Из этого следует, что скользящее движение системы (17) асимптотически устойчиво, при этом $e_1(t) \rightarrow 0$ and $e_2(t) \rightarrow 0$.

Известно [37], что скользящее движение обеспечивает равенства $\dot{e}(t) = 0$ и $e(t) = 0$, а поскольку матрица F_{**} устойчива, равенство (17) влечет $0 = v(t) - ad(t) + \Delta \Psi_1(t)$. Так как согласно замечанию после (18) справедливо неравенство $\|\Delta \Psi_1(t)\| \leq N_{*1}\|e(t)\| = 0$, то функция $d(t)$ может быть оценена в виде

$$d(t) = -g|a| \frac{e_y(t)}{a(\|e_y(t)\| + \delta)},$$

где δ – малое положительное число. Отметим, что правая часть этого уравнения зависит только от ошибки $e_y(t) = y_*(t) - R_* y(t)$.

6. Шумы измерений

В случае, когда присутствуют шумы измерений, основной результат работы остается прежним, но требования к величине g становятся более жесткими для обеспечения скользящего режима. Действительно, пусть $y(t) = Hx(t) + \rho_s(t)$, где $\rho_s(t)$ – ограниченная функция времени, описывающая шумы измерений и $\|\rho_s(t)\| \leq S_*$.

Чтобы принять эти шумы во внимание, модель (14) корректируется следующим образом:

$$\begin{aligned}\dot{x}_{*1}(t) &= x_{*2}(t) + G_{*1}u(t) + J_{*1}Hx(t) + C_{*1}\Psi(x_{*}(t), Hx(t), u(t)) + ad(t), \\ \dot{x}_{**}(t) &= F_{**}x_{**}(t) + G_{**}u(t) + J_{**}Hx(t) + C_{**}\Psi(x_{*}(t), Hx(t), u(t)), \\ y_{*}(t) &= x_{*1}(t).\end{aligned}$$

Тогда уравнение (17) для переменной $e_1(t)$ дополняется слагаемым $J_{*1}\rho_s(t)$. Предполагается для простоты, что шумами измерений во второй подсистеме можно пренебречь; такое предположение справедливо, например, когда шумы во второй подсистеме существенно (на несколько порядков величины) меньше:

$$\begin{aligned}\dot{e}_1(t) &= -be_1 + Qe_2(t) - ad(t) + J_{*1}(y(t) - Hx(t)) + \Delta\Psi_1(t) + v(t) = \\ &= -be_1 + Qe_2(t) - ad(t) + J_{*1}\rho_s(t) + \Delta\Psi_1(t) + v(t)\end{aligned}\quad (20)$$

при этом

$$\|\Delta\Psi_1(t)\| \leq N_{*1}\|e(t)\| + M_{*1} \leq N_{*1}\|e_1(t)\| + N_{*1}\|e_2(t)\| + M_{*1} + S_{**},$$

где

$$S_{**} = S_{*} \left\| \frac{\partial C_{*}\Psi(x_{*}, y_{*}, u)}{\partial y} \right\|.$$

Тогда можно показать, что $V(t) < 0$, если

$$g > \|d(t)\| + \frac{M_{*1} + \|J_{*1}\|S_{*} + S_{**}}{|a|},$$

что гарантирует существование скользящего режима. Поскольку шумы измерений входят в уравнение (20), оценка функции $d(t)$ производится с погрешностью, не превышающей $\|J_{*1}\|S_{*} + S_{**}$.

7. Практический пример

Этот пример привлекает разработанные выше теоретические результаты для решения рассмотренной в разделе 1 проблемы неточного позиционирования лазерного луча исполнительным приводом, детально описанной в [9, 12, 13]. Рассмотрим модель электропривода согласно [31]:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1(t) &= \frac{1}{i_p}x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) &= \frac{K_M}{J_H}x_3(t) - \frac{K_d}{J_H}\text{sign}(x_2(t)) + \rho(t), \\ \dot{x}_3(t) &= -\frac{K_\omega}{L_m}x_2(t) - \frac{R_m}{L_m}x_3(t) + \frac{K_u}{L_m}u(t) + d(t),\end{aligned}\quad (21)$$

где $x_1(t)$ – угол поворота выходного вала редуктора; $x_2(t)$ – скорость вращения ротора электродвигателя; $x_3(t)$ – ток якоря; i_p – передаточное отношение редуктора; J_H – номинальный момент инерции вала электродвигателя и вращающихся частей редуктора; K_ω и K_M – коэффициенты противо-э.д.с. (электродвижущая сила) и крутящего момента; K_d – момент сухого трения на валу электродвигателя; R_m и L_m – активное сопротивление и индуктивность цепи якоря; K_u – коэффициент усиления.

Предполагается, что дефект $d(t) = -(\tilde{R}_m/L_m)x_3(t)$ соответствует отклонению $\tilde{R}$ активного ≠внешним нагрузочным моментом $\tilde{M}(t)$, приложенным к валу электродвигателя.

Обозначим

$$k_1 = \frac{1}{i_p}, k_2 = \frac{K_M}{J_H}, k_3 = -\frac{K_\omega}{L_m}, k_4 = -\frac{R_m}{L_m}, k_5 = \frac{K_u}{L_m}.$$

Предполагая, что измеряются переменные $x_1(t)$ и $x_2(t)$, получаем матрицы, описывающие электропривод:

$$F = \begin{pmatrix} 0 & k_1 & 0 \\ 0 & 0 & k_2 \\ 0 & k_3 & k_4 \end{pmatrix}, G = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ k_5 \end{pmatrix}, H = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, D = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, L = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix},$$

$$\Psi(x, u) = \text{sign}(Ax), A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Отметим, что $\text{rank}(H[LD]) = 1 \neq \text{rank}([LD]) = 2$, следовательно, подход, предложенный в [21], здесь не может быть использован.

Построим редуцированную модель, не чувствительную к возмущениям. Примем $k = 1$ и найдем матрицы $V^{(1)}$, $L^{(1)}$ и $D^{(1)}$:

$$V^{(1)} = \begin{pmatrix} 0 & k_1 & 0 \\ 0 & k_3 & k_4 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad L^{(1)} = D^{(1)} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Ясно, что произвольная строка $(R_{*} - J_{*})$ удовлетворяет уравнению (12). Поскольку $\text{rank}(V^{(1)}) = 3 < 2(1 + 1) = 4$, уравнение (8) имеет решение с матрицами $R_{*} = (k_3 - k_1)$ и $J'_{*} = J_{*} = (0 - k_1 k_4)$, что в результате дает $\Phi = (k_3 \ 0 \ -k_1)$, $C_{*} = 0$, и $G_{*} = -k_1 k_5$. В результате модель (14) становится линейной и имеет вид

$$\begin{aligned}\dot{x}_{*} &= k_1 k_4 y_2(t) - k_1 k_5 u(t) - k_1 d(t), \\ y_{*2}(t) &= x_{*2}(t),\end{aligned}\quad (22)$$

где $x_{*}(t) = k_3 x_1(t) - k_1 x_3(t)$, $a = \Phi D = -k_1$.

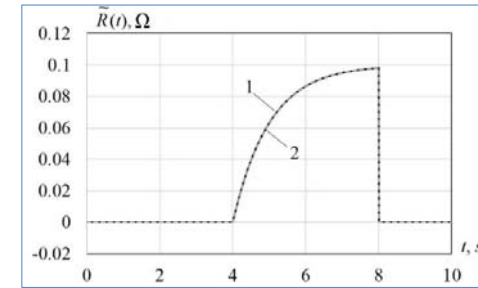


Рис. 3. Поведение функции $\tilde{R}$ и ее оценка
Fig. 3. Behavior of the function $\tilde{R}$ and its estimation

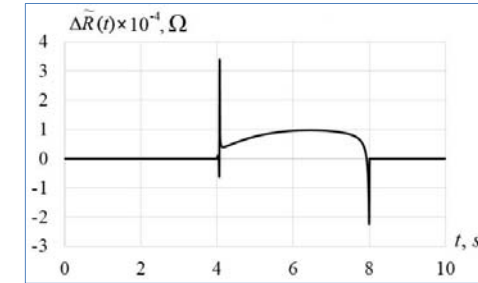


Рис. 4. Поведение ошибки оценивания
Fig. 4. Behavior of the fault estimation error $\hat{\tilde{R}} - \tilde{R}$

Скользящий наблюдатель описывается уравнениями

$$\begin{aligned}\hat{\dot{x}}_{*}(t) &= -k_1 k_4 y_2(t) - k_1 k_5 u(t) - b e_y(t) + v(t), \\ \hat{y}_{*2}(t) &= \hat{x}_{*2}(t),\end{aligned}\quad (23)$$

где $b > 0$,

$$e_{y2}(t) = \hat{y}_{*}(t) - (k_3 y_1(t) - k_1 y_2(t)),$$

разрывная переменная $v(t)$ дается выражением (16). Так как $a = -k_1 < 0$, функция $d(t)$ оценивается в виде

$$\hat{d}(t) = g \frac{e_y(t)}{|e_y(t)| + \delta}. \quad (24)$$

Для моделирования рассмотрим систему (21) и наблюдатель (23) и примем $J_H = 0.0001 \text{ Kg m}^2$, $K_\omega = 0.02 \text{ Vs}$, $K_U = 100$, $R_m = 0.4 \Omega$, $L_m = 0.004 \text{ H}$, $K_M = 0.02 \text{ Nm/A}$, $i_p = 100$. Для обеспечения качественного переходного процесса используется PID регулятор. Управление $u(t)$ выбирается таким, чтобы заданное величина угла поворота выходного вала редуктора подчинялась закону $x_1^{ref}(t) = \sin(t)$.

Возмущение $\rho(t)$ интерпретируется как внешний нагрузочный момент и задается функцией $\tilde{M}(t) = 0.10 \sin(0.8t) \text{ Nm}$ на интервале от 1 до 10 ms. Дефект $d(t)$ вызван отклонением $\tilde{R}(t) = 0.2 \sin(0.2t - 0.8)$ активного сопротивления R_m на интервале от 4 до 8 ms.

Результаты моделирования с $g = 100$ и $\delta = 10^{-5}$ в (24) приведены на рис. 3 и 4, символом 1 обозначена функция $\tilde{R}(t)$, символом 2 – ее оценка согласно (24). Рис. 4 показывает поведение ошибки оценивания. Поскольку на интервале от 0 до 4 ms и от 8 до 10 ms оценка равна нулю, наблюдатель (23) нечувствителен к возмущению $\rho(t)$.

8. Заключение

В статье решалась задача идентификации дефектов в системах, описываемых нелинейными моделями в присутствии возмущений, на основе скользящих наблюдателей с применением к группе различных типов мобильных роботов. Предложенная модификация этого метода состоит в использовании редуцированной (имеющей меньшую размерность) модели исходной системы, представленной уравнениями (3), (14) и (22), которые получены на основе канонической формы (6) матриц F_* и H_* . Это, как следствие, дает такие преимущества для рассматриваемой технической системы группы МР: уменьшение сложности скользящих наблюдателей и ослабление условий, налагаемых на исходную систему, по сравнению с известными методами. На практике это означает, что управленческие решения в этой группе роботов становятся более робастными и инвариантными к целому классу возмущающих факторов. Это позволяет на физическом уровне фильтровать информационные выбросы и существенно улучшить показатели группы в реальной обстановке.

Список литературы / References

- [1] L. Jaulin. Mobile Robotics, 1st Edition. ISTE Press-Elsevier, 2015, 314 p.
- [2] G. Klancar, A. Adezar, S. Blazic, and I. Skrjanc. Wheeled Mobile Robots: From Fundamentals Towards Autonomous Systems. Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2017, 502 p.
- [3] G. Klancar, D. Matko, and S. Blazic. Wheeled mobile robots control in a linear platoon. Journal of Intelligent and Robotic Systems, vol. 54, 2017, pp. 709-731.
- [4] М.В. Иванов, О.Ю. Сергиенко, В.В. Тырса и др. Интеграция беспроводной связи для оптимизации распознавания окружения и расчёта траектории движения группы роботов. Труды ИСПРАН, том 31, вып. 2, 2019 г., стр. 67-82. DOI: 10.15514/ISPRAS-2019-31(2)-6 М.В. Иванов, О. Сергиенко, В. Тырса et al. Software advances using n-agents wireless communication integration for optimization of surrounding recognition and robotic group dead reckoning. Programming and Computer Software, vol. 45, issue 8, 2019, pp. 557-569.
- [5] В.Ю. Осипов. Автоматический синтез программ действий интеллектуальных роботов. Программирование, том 42, no. 3, 2016 г., стр. 47-54 / V. Osipov. Automatic synthesis of action programs for intelligent robots. Programming and Computer Software, Springer, vol. 42, no. 3, 2016, pp. 155-160.
- [6] А.Д. Жданов, Д.Д. Жданов, Н.Н. Богданов и др. Проблемы дискомфорта зрительного восприятия в системах виртуальной и смешанной реальности. Программирование, том 45, no. 4, 2019 г., стр. 9-18 / A.D. Zhdanov, D.D. Zhdanov, N.N. Bogdanov et al. Discomfort of Visual Perception in Virtual and Mixed Reality Systems. Programming and Computer Software, vol. 45, no. 4, 2019, pp. 147-155.
- [7] А.С. Ярыгина. Методы выполнения и оптимизации приближенных запросов в неоднородных системах. Программирование, том 39, no. 6, 2013 г., стр. 33-44 / A. Yarygina. Execution and

- optimization techniques for approximate queries in heterogeneous systems. Programming and Computer Software, vol. 39, 2013, pp. 309-317.
- [8] Г.В. Безмен, Н.В. Колесов. Использование программных моделей для диагностирования информационно-управляющих систем. Программирование, том 40, no. 5, 2014, стр. 56-67 / G. Bezmen and N. Kolesov. Program models for diagnosis of information control systems. Programming and Computer Software, vol. 40, no. 2014, pp. 250-258.
- [9] L. Lindner, O. Sergiyenko, M. Rivas-Lopez et al. Exact laser beam positioning for measurement of vegetation vitality. Industrial Robot: An International Journal, vol. 44, issue 4, 2017, pp. 532-541.
- [10] O.Yu. Sergiyenko. Optoelectronic system for mobile robot navigation. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, vol. 46, no. 5, 2010, pp. 414-428.
- [11] O.Yu. Sergiyenko, M.V. Ivanov, V.V. Tyrsa et al. Data transferring model determination in robotic group. Robotics and Autonomous Systems, vol. 83, 2016, pp. 251-260.
- [12] M. Reyes-García, O. Sergiyenko, M. Ivanov et al. Defining the final angular position of DC motor shaft using a trapezoidal trajectory profile. In Proc. of the IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE2019), 2019, pp. 1694-1699.
- [13] C.A. Sepúlveda-Valdez, O. Sergiyenko, D. Hernandez-Balbuena et al. Circular scanning resolution improvement by its velocity close loop control. In Proc. of the IEEE 28th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE2019), 2019, pp. 244-249.
- [14] M. Ruderman and M. Iwasaki. Observer of nonlinear friction dynamics for motion control. IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 62, no. 9, 2015, pp. 5941-5949.
- [15] О.Ю. Сергиенко, С.П. Павлов. Анализ природы атомно-молекулярного взаимодействия поверхностей трения. Вестник национального технического университета "ХПИ", том 1, no. 6, 2002 г., стр. 39-43 / O.Yu. Sergiyenko and S.P. Pavlov. Analysis of the nature of the atomic-molecular interaction of the friction surfaces. Vestnik Natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta: Kharkovskiy Politechnicheskiiy Institut, vol. 1, no. 6, 2002, pp. 39-43 (in Russian)
- [16] M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, and M. Staroswiecki. Diagnosis and Fault-Tolerant Control. Springer-Verlag, 2006, 672 p.
- [17] S. Ding. Data-driven design of fault diagnosis and fault-tolerant control systems. Springer-Verlag, 2014, 300 p.
- [18] I. Samy, I. Postlethwaite, and D. Gu. Survey and application of sensor fault detection and isolation schemes. Control Engineering Practice, vol. 19, 2011, pp. 658-674.
- [19] V. Utkin. Sliding Modes in Control Optimiztion. Springer, Berlin, 1992, 286 p.
- [20] K. Chandra, H. Alwi, and C. Edwards. Fault reconstruction for a quadrotor using an lpv sliding mode observer. IFAC-PapersOnLine, vol. 48, issue 21, pp. 374-379, 2015.
- [21] C. Edwards, S. Spurgeon, and R. Patton. Sliding mode observers for fault detection and isolation. Automatica, vol. 36, 2000, pp. 541-553.
- [22] C. Tan and C. Edwards. Sliding mode observers for robust detection and reconstruction of actuator and sensor faults. International Journal of Robust Nonlinear Control, vol. 13, 2003, pp. 443-463.
- [23] C.P. Tan and C. Edwards. Robust fault reconstruction using multiple sliding mode observers in cascade: development and design. In Proc. of the American Control Conference, 2009, pp. 3411-3416.
- [24] A. Zhirabok, A. Zuev, and A. Shumsky. Fault diagnosis in linear systems via sliding mode observers. International Journal of Control, vol. 94, issue 2, 2021, pp. 327-335.
- [25] A. Brahimi, S. Dhahri, F. Hmida, and A. Sellami. Simultaneous actuator and sensor faults reconstruction based on robust sliding mode observer for a class of nonlinear systems. Asian Journal of Control, vol. 19, issue 1, 2017, pp. 362-371.
- [26] J. He and C. Zhang. Fault reconstruction based on sliding mode observer for nonlinear systems. Mathematical Problems in Engineering, vol. 2012, 2012, pp. 1-22.
- [27] X. Yan and C. Edwards. Nonlinear robust fault reconstruction and estimation using a sliding modes observer. Automatica, vol. 43, 2007, pp. 1605-1614.
- [28] J. Chan, C. Tan, and H. Trinh. Robust fault reconstruction for a class of infinitely unobservable descriptor systems. International Journal of Systems Science, vol. 48, issue 8, 2017, pp. 1646-1655.
- [29] H. Alwi and C. Edwards. Fault tolerant control using sliding modes with on-line control allocation. Automatica, vol. 44, 2008, pp. 1859-1866.
- [30] C. Edwards, H. Alwi, H. and C. Tan. Sliding mode methods for fault detection and fault tolerant control with application to aerospace systems. International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, vol. 22, 2012, pp. 109-124.

- [31]. V. Filaretov, A. Zuev, A. Zhirabok, and A. Protchenko. Development of fault identification system for electric servo actuators of multilink manipulators using logic-dynamic approach. *Journal of Control Science and Engineering*, vol. 2017, 2017, pp. 1–8.
- [32]. H. Meziane, C. Labarre, S. Lefteriu, M. Defoort, and M. Djemai. Fault detection and isolation for a multi-cellular converter based on sliding mode observer. *IFAC-PapersOnLine*, volume 48, issue 21, 2015, pp. 164-170.
- [33]. M. Mohamed, X-G. Yan, S. Spurgeon, and B. Jiang. Robust sliding mode observer design for interconnected systems with application to multimachine power systems. In *Proc. of the IEEE Conference on Decision and Control*, 2016, pp. 6246–6251.
- [34]. K. Zhang, B. Jiang, X. Yan, and Z. Mao. Sliding mode observer based incipient sensor fault detection with application to high-speed railway traction device. *ISA Transactions*, vol. 63, 2016, Pages 49-59.
- [35]. M. Corradini, G. Orlando, and G. Parlangeli. A fault tolerant sliding mode controller for accommodating actuator failures. In *Proc. of the 44th IEEE Conference on Decision and Control*, 2005, pp. 3091–3096.
- [36]. C. Edwards, H. Alwi, H. and C. Tan. Sliding mode methods for fault detection and fault tolerant control. In *Proc. of the Conference on Control and Fault-Tolerant Systems*, 2010, pp. 106–117.
- [37]. C. Edwards and C. Tan. A comparison of sliding mode and unknown input observers for fault reconstruction. *European Journal of Control*, vol. 12, 2006, pp. 245–260.
- [38]. А.Н. Жирабок, А.Е. Шумский, С.В. Павлов. Диагностирование линейных динамических систем непараметрическим методом. *Автоматика и телемеханика*, no. 7, 2017, стр. 3-21 / A. Zhirabok, A. Shumsky, and S. Pavlov. Diagnosis of linear dynamic systems by the nonparametric method. *Automation and Remote Control*, vol. 78, 2017, pp. 1173–1188.
- [39]. A. Zhirabok, A. Shumsky, S. Solyanik, and A. Suvorov. Fault detection in nonlinear systems via linear methods. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, vol. 27, no. 2, 2017, pp. 261–272.

Информация об авторах / Information about authors

Олег Юрьевич СЕРГИЕНКО – доктор технических наук, заведующий отделом прикладной физики Института инженерии. Область научных интересов: автоматизированная метрология, системы машинного зрения, быстрые электрические измерения, системы управления, роботизированная навигация и лазерные 3D-сканеры.

Oleg Yurievich SERGIYENKO, Doctor of Technical Sciences, Head of Applied Physics Department of Instituto de Ingenieria. Research interests: automated metrology, machine vision systems, fast electrical measurements, control systems, robot navigation and 3D laser scanners.

Алексей Нилович ЖИРАБОК – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматизации и управления. Область научных интересов: теория нелинейных систем, диагностика неисправностей, скользящие наблюдатели.

Alexey Nilovich ZHIRABOK, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Automation and Control. Research interests: nonlinear system theory, fault diagnosis, sliding mode observers.